

# 매우 짧은 펄스를 이용한 RZ 포맷 광전송의 성능과 전송용 광섬유의 색분산과의 상관관계

정회원 박상규\*, 정제명\*

## High Speed RZ-Format Transmission Using Very Short Pulses and the Chromatic Dispersion of the Transmission Fiber

Sang-Gyu Park\*, Je Myung Jeong\* *Regular Members*

### 요약

매우 짧은 펄스를 이용한 40-Gb/s 광전송의 성능과 전송용 광섬유의 색분산과의 관계를 컴퓨터 시뮬레이션을 사용하여 연구하였다. 매우 짧은 펄스를 사용할 경우 펄스매우 짧은 펄스를 이용한 40-Gb/s 광전송의 성능과 전송용 광섬유의 색분산과의 관계를 컴퓨터 시뮬레이션을 사용하여 연구하였다. 매우 짧은 펄스를 사용할 경우 펄스의 넓은 스펙트럼이 광섬유의 색분산과 어우러져서 광섬유의 비선형성에 의한 신호의 왜곡이 억제된다. 이러한 억제의 정도는 광섬유의 색분산, 광신호의 세기 그리고 전송거리 등에 의해 복합적으로 결정된다. 3ps의 길이를 갖는 펄스가 사용되었을 경우 광신호의 세기가 너무 높지 않을 때, 눈 잠김 페널티는 광섬유의 색분산이  $D=4\text{ps/nm/km}$  일 경우 가장 컸으며 그 양쪽으로 페널티는 줄어들었다.

### ABSTRACT

The dependence of the performance of 40-Gb/s optical transmission using short pulses on the fiber chromatic dispersion is numerically studied. When very short pulses are used, the wide spectrum of the optical signal and the chromatic dispersion of the fiber interact in such a way that results in the reduction of nonlinear impairments of the transmission performance. The degree of this reduction is determined by the combined effects of chromatic dispersion of the fiber and the strength of the optical signal and the transmission distance. When 3ps-long pulses were used for the transmission, the eye-closure penalty was highest with the dispersion  $D=4\text{ps/nm/km}$ .

### I. 매우 짧은 펄스를 사용한 RZ 포맷의 광전송

WDM(wavelength division multiplexing)을 이용한 대용량의 광전송은 현재 매우 집중적으로 연구되고 있다. WDM 시스템의 전송용량을 증가시키기 위해서는 파장채널당의 전송용량을 높이는 방법과 채널의 수를 늘리는 방법이 있으며 이 두 가지 방법을 사용한 연구가 모두 활발히 진행되고 있는데, 본 논문은 그 중에서 주파수 채널당의 전송속도를

40Gbps 혹은 그 이상으로 높일 때 생기는 문제점을 매우 짧은 펄스를 사용한 RZ 포맷의 광전송을 통하여 해결하는 방법에 관한 것이다.

광전송의 채널 당 전송속도를 증가시키기 위해서는 전송속도와 함께 높아지는 OSNR(optical signal to noise ratio) 요구조건 만족, 광섬유 색분산의 보다 정밀한 보상, 편광모드분산의 보상 등의 여러 가지 문제를 해결해야 하는데, 이 중 가장 기본적인 문제를 든다면 전송속도의 증가에 따라 올라가는

\* 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부 (sanggyu@hanyang.ac.kr)  
논문번호 : 010187-0720, 접수일자 : 2001년 7월 20일

※ 박상규의 연구는 한국과학재단 목격기초연구(R01-2001-00542) 지원으로 수행되었습니다.

정제명의 연구는 광주과학기술원 초고속 광네트워크 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

OSNR 요구조건일 것이다<sup>[1]</sup>.

OSNR를 향상시키는데 근본적인 장애가 되는 것은 광섬유의 비선형성에 의한 신호의 왜곡이다<sup>[2]</sup>. 높은 OSNR를 얻기 위하여 단순히 더 센 광신호를 송신하는 것은 광섬유의 비선형성에 의한 신호의 왜곡을 초래하며 이는 또 다른 성능의 저하로 귀결된다. 따라서 OSNR의 문제는 광섬유의 비선형성과 깊히 연관이 되어 있으며, 고속 광전송을 위해서는 이 두 가지를 동시에 만족시키는 해법을 찾아야 한다.

신호의 세기를 증가시키지 않고 OSNR를 높이는 방법으로 가장 손쉬운 것은 광증폭기 사이의 간격을 좁히는 것이다<sup>[3]</sup>. 하지만 이는 광전송 시스템의 경제성에 매우 나쁜 영향을 끼치게 되므로 실제 시스템을 설계할 때에는 사용하기 어렵다. 보다 현실적으로 현재 많이 연구되고 있는 방법은 분산형 Raman 증폭기를 이용하여 증폭기간의 실효 간격을 줄이는 방법<sup>[4]</sup>, 일반적으로 사용되는 NRZ(non return to zero) 포맷이 아닌 다른 변조 형식<sup>[5,6]</sup>, 또 OSNR의 저하를 감수하는 대신 전송성능을 코딩을 사용하여 얻는 방법 같은 것이다<sup>[7]</sup>.

최근에, 위에서 말한 새로운 변조 형식의 하나로써, 매우 짧은 펄스를 사용한 RZ 포맷의 광전송이 발표되었다<sup>[8-10]</sup>. 매우 짧은 펄스는 그 길이에 반비례하는 넓은 스펙트럼 폭을 갖는다. 예를 들어 3ps 길이의 펄스는 약 100~150GHz의 스펙트럼 폭을 갖는데 이는 40Gbps의 정보량이 요구하는 최소한의 스펙트럼의 폭보다 훨씬 큰 값이다. 이렇게 넓은 스펙트럼에 분산된 광신호가 큰 색분산을 갖는 광섬유를 진행할 때는 비선형성에 의한 신호의 왜곡이 많이 줄어들게 된다. 통상적인 NRZ 포맷의 광전송에서 가장 영향을 많이 끼치는 비선형 효과는 자기 위상변조(SPM)이다<sup>[11]</sup>. SPM은 광섬유의 굴절률이 광신호의 세기에 따라 달라지기 때문에 생기는 것으로 SPM 효과에 의하여 펄스의 앞부분과 뒷부분에는 위상의 변조가 유도되고 이것이 신호의 왜곡으로 연결되게 된다. 하지만, 매우 짧은 펄스들은 큰 색분산을 갖는 광섬유를 진행할 때 매우 빨리 퍼지게 된다. 예를 들어 3ps의 길이를 갖는 펄스의 길이가 2배로 커지는 데는 S-SMF안에서 불과 수백 미터 밖에 걸리지 않는다<sup>[12]</sup>. 즉 SPM에 의하여 펄스들의 위상이 충분히 변조되기 이전에 펄스들이 흩어져서 비선형성이 작용할 시간을 단축한다. 물론 광전송 시에는 단일 펄스가 진행되는 것이 아니고 여러 개의 펄스들이 같이 진행하게 된다. 이 경우,

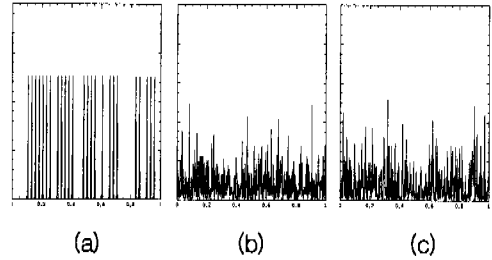


그림 1. 길이가 3ps인 펄스들의 D=17ps/nm/km를 갖는 표준 단일모드 광섬유 안에서의 진행

넓게 퍼진 여러 개의 펄스들에서 나온 파동의 성분들은 서로 간섭하여 시간에 따라 변하는 피크들을 만든다. 이러한 펄스들의 진행을 컴퓨터 시뮬레이션한 것이 그림 1에 나와 있다. 비선형성에 의한 신호 왜곡의 감소는 펄스가 단독으로 진행할 때 빨리 퍼지는 것과 마찬가지로, 간섭에 의해 새로이 형성되는 피크들도 광섬유의 색분산에 의하여 매우 빨리 변하는 것에 기인한다. 즉, 각각의 펄스들에서 나온 주파수 성분들이 분산에 의해 서로 다른 속도로 이동할 때 피크의 모양은 매우 빠르게 변하는데, 이 때문에 어떤 주파수 성분에 가해진 위상변조는 바로 다음 순간에 반대 방향의 변조에 의해 상쇄될 수 있으며, 이러한 평균화 작용에 의해 비선형성에 의한 왜곡이 줄어드는 것이다.

위에서 본 와 같이 매우 짧은 펄스를 사용한 광전송에서 광섬유의 색분산은 매우 중요한 역할을 한다. 그러나 아직 광섬유의 색분산과 광전송과의 상관관계에 대한 체계적인 연구는 부족한 형편이다. 한 논문에서는 분산보상소자의 배치에 관한 보고가 있었으나 연구는 S-SMF(D=17ps/nm/km)와 NZDSF(Non-Zero Dispersion Shifted Fiber:D=4ps/nm/km)에 제한되었다<sup>[13]</sup>. 본 연구에서는 매우 짧은 펄스를 이용한 40Gbps 광전송의 전송성능과 전송에 사용되는 광섬유의 색분산과의 상관관계를 살펴본다. 현재 매우 여러 종류의 광섬유들이 제작되고 있으며 이들의 장단점에 관한 많은 연구가 이루어지고 있다. 따라서 이들 광섬유의 짧은 펄스를 사용한 고속 광전송에의 적합성을 살펴보는 것은 의미 있는 일이다.

본 연구에서는 매우 짧은 펄스를 사용한 광전송과 광섬유의 색분산의 상관관계를 컴퓨터를 사용한 시뮬레이션을 통하여 살펴보았다. 제 2장에서는 본 연구에서 사용한 시뮬레이션 방법에 대하여 기술하고 제 3장에서는 시뮬레이션 결과를 제시하며 제 4장에서 결론을 맺는다.

## II. 컴퓨터 시뮬레이션 방법

본 연구에서는 split-step Fourier 변환 시뮬레이터가 사용되었다<sup>[12]</sup>. 광섬유 안을 신호가 진행할 때 일어나는 중요한 두 가지 현상이 비선형성과 분산인데 Split-step Fourier 변환 방법에서는 이들 현상들을 각각 다루기 쉬운 시간 공간과 주파수 공간에서 처리하며 이 두 공간사이를 FFT를 사용하여 왕복 함으로써 계산시간을 단축한다.

시뮬레이션에서 고려된 전송선로는 100km 길이를 갖는 10개의 광섬유 스패들로 구성되었으며 이들 스패들은 광증폭기들로 연결되었다. 광섬유의 손실로는 0.2dB/km를 사용하였으며, 이 연구는 비선형성과 색분산과의 관계에 초점을 맞추었기 때문에 광증폭기의 잡음은 고려되지 않았다. 색분산 보상은 매 100km 스패마다 이루어졌다. 짧은 펄스를 이용한 전송에서 색분산 보상 소자의 위치가 전송 성능에 많은 영향을 주지 않는 것은 이미 밝혀져서, 색분산 보상이 여러 스패를 이용한 장거리 전송이 완전히 끝난 후에 행해진 실험 결과들이 발표되었다<sup>[8-9]</sup>. 본 시뮬레이션에서 색분산 보상이 매 스패마다 이루어진 것은 시뮬레이션 속도에 대한 고려 때문이다. 즉 큰 색분산 값을 갖는 선로에 큰 스펙트럼을 갖는 신호가 퍼지면서 진행하는 것을 시뮬레이션을 할 때에는 시뮬레이션을 하는 시간 구간이 충분히 커야 하며, 또한 매우 짧은 펄스의 시뮬레이션을 위해서는 작은 시간 스텝이 필요하다. 이 두 가지를 모두 만족시키기 위해서는 매우 많은 스텝 수가 필요한데 1000km 동안 색분산 보상이 이루어지지 않는다면 스텝수가 너무 많아져 시뮬레이션 시간이 너무 길어지게 된다. 전송광섬유 안에서 일어나는 현상에 집중하기 위해서 색분산 보상소자는 모두 비선형성을 갖지 않는다고 가정하였는데, 최근에 발표된 비선형성이 매우 작은 색분산 보상 소자들에 의해 이러한 가정이 정당화될 수 있다<sup>[14-15]</sup>.

전송되는 광신호는 2048개의 길이를 갖는 PRBS (pseudo random bit sequence)로 구성되었다. PRBS를 구성하는 각각의 펄스들은 3ps의 FWHM(full width half maximum)을 갖는 secant hyperbolic 형태로 만들어졌다. 전송 성능은 가상의 수신기를 통과한 이후의 eye-diagram에서 눈 잠김-페널티를 계산하여 결정하였는데, 수신기는 160GHz의 폭을 갖는 광학필터와 34GHz의 폭을 갖는 전기적 필터를 직렬로 연결하여 구성되었다. 시뮬레이션은 광섬유의

색분산을 2에서 16ps/nm/km까지 2ps/nm/km의 간격으로 바꾸어가며 되풀이 되었다.

## III. 시뮬레이션 결과

그림 2에 전송거리에 따른 눈 잠김 페널티의 변화가 여러 가지의 광섬유의 색분산 값에 대해서 나타나있다. 그림 2 (a)는 광증폭기의 출력이 0dBm인 경우를 나타내고 있는데, 눈 잠김 페널티가 전송 거리에 따라 매우 완만하게 증가하며 1000km에서도 그 값이 모든 색분산 값에 대해서 0.4dB 미만에 머무는 것을 알 수 있다. 그림 2 (b)의 광증폭기 출력이 8dBm인 경우는 매우 다른 결과를 보여주는데, 광섬유의 색분산이 매우 작을 때는 페널티가 비교적 낮은 값을 유지하여 1000km 뒤에도 약 1dB 정도가 되지만 광섬유의 색분산이 클 때에는 페널티 또한 매우 커져서 가령 색분산의 값에 따라서는 1000km 전송 후에 페널티는 4dB를 넘게 된다. 한편, 그림 2를 자세히 보면 페널티가 단순히 색분산의 증가와 함께 커지지 않는 것을 알 수 있다. 이것을 보다 알게 쉽게 나타낸 것이 그림 3으로, 이 그림에는 색분산 값의 변화에 따른 눈 잠김 페널티의 변화가 나타나 있다. 그림 3 (a)는 증폭기 출력이 0dBm인 경우를 나타내는데, 페널티는 색분산이 4ps/nm/km에서 최고값을 보이며 그 양쪽으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 색분산 값에 따라 페널

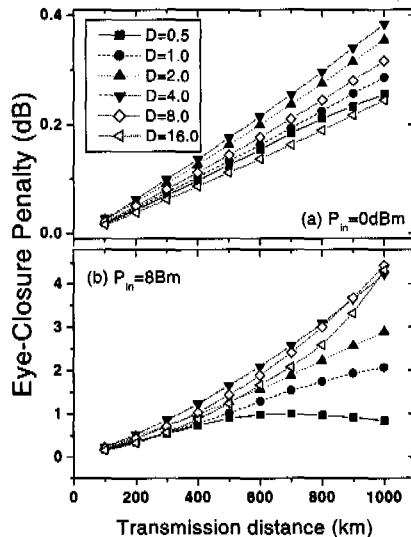


그림 2. 전송 거리에 따른 눈 잠김 페널티의 변화 광증폭기의 출력: (a) 0dBm (b) 8dBm

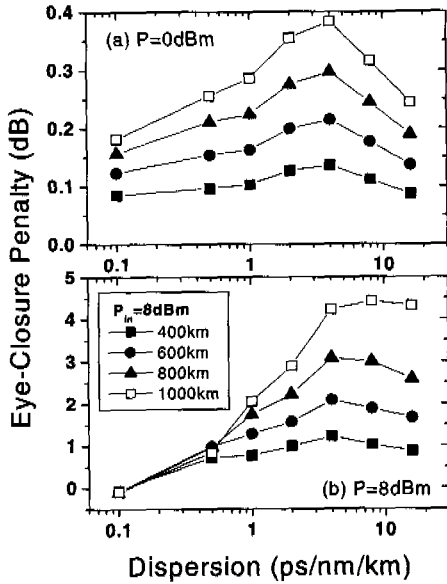


그림 3. 광섬유의 색분산과 눈 잠김 페널티의 상관관계

티 값이 달라지는 것은 다음과 같이 설명될 수 있다. 매우 작은 색분산에서는 펄스들이 빨리 퍼지지 않아서 매우 짧은 펄스의 효과가 충분히 나타나지 않기 때문에 자기위상변조는 매우 커진다. 그럼에도 불구하고 페널티가 작게 나타난 것은 자기위상변조에 의한 위상변조가 진폭변조로 바뀌지 않았기 때문이다. 또 매우 높은 색분산에서는 짧은 펄스를 사용한 전송에서의 비선형성 억제가 효과를 발휘하여 페널티 값이 줄어들게 된다. 그림 3 (b)는 증폭기 출력이 8dBm인 경우를 나타낸다. 이 경우 결과는 0dBm의 경우와 약간 다른 것을 볼 수 있다. 즉 0dBm의 경우에서와 같이 4ps/nm/km 정도의 색분산에서 페널티가 뚜렷이 최고값을 가지는 현상은 전송거리가 짧을 때로 국한된다. 즉 1000km의 경우를 보면 색분산이 4ps/nm/km 이상에서도 페널티가 줄어들지 않고 최고값을 유지하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 매우 센 크기의 신호가 사용될 경우 매우 짧은 펄스를 사용한 포맷의 비선형성 억제가 한계에 달했기 때문인 것으로 생각되며, 일단 짧은 펄스의 효과가 효력을 상실하게 되면 높은 색분산의 경우 위상변조를 진폭변조로 효과적으로 전환해주는 성질만이 작용하므로, 색분산이 클수록 나쁜 전송성능을 나타내게 된다.

일반적으로 광증폭기의 출력은 대체로 시스템이 어느 정도의 OSNR을 요구하는 가에 따라 결정된다. 위의 결과는 짧은 펄스를 사용한 포맷의 유효한

가의 여부가 어느 정도의 OSNR이 필요한가에 따라 결정됨을 보여준다. 즉 너무 크지 않은 OSNR (그러나 일반적인 NRZ 포맷에는 너무 큰 OSNR)의 경우에는 이 포맷이 유효하게 사용될 수 있다. 하지만 OSNR 요구조건이 너무 클 경우에는 매우 큰 증폭기 출력을 사용하여야 하고 이 경우 짧은 펄스에 의한 비선형성 억제는 그 효력을 잃는다. 또한 이 포맷이 효력을 잃는 신호의 세기는 전송거리에 따라 달라진다. 즉 그림 3에서 보듯이 전송거리가 짧을 때에는 매우 큰 색분산에서 전송성능이 좋아지는 짧은 펄스의 효과가 8dBm의 출력에서도 남아 있지만 전송거리가 길어 질 때에는 그 효과가 사라지게 된다.

또한, 위의 결과를 해석할 때는 한가지 주의 할 점이 있다. 즉, 위의 결과만을 놓고 본다면 매우 큰 색분산과 작은 색분산 모두가 고속전송에 유리할 것으로 보여진다. 실제로 여러 개의 파장채널을 함께 사용하는 WDM 시스템이 아니라면 그러한 결론이 맞을 것이다. 하지만 WDM 시스템에서는 파장 채널들간의 4파파혼합에 의한 상호작용 때문에 매우 작은 색분산은 전송에 매우 나쁜 영향을 준다는 것이 잘 알려져 있다<sup>[6]</sup>.

마지막으로 짧은 펄스를 이용한 포맷의 성능과 펄스의 폭의 관계는 전송속도 및 광섬유의 분산에 의존할 것으로 예상되는데 이는 현재 연구중에 있다.

#### IV. 결론

이 논문에서는 매우 짧은 펄스를 사용한 RZ 포맷의 광전송과 전송용 광섬유의 색분산과의 상관관계가 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 연구되었다. 우리는 짧은 펄스를 이용한 전송의 전송성능이 광섬유의 색분산에 결정적으로 좌우된다는 것과 또한 짧은 펄스를 사용함에 의한 비선형성의 억제정도는 사용되는 광신호의 세기와 전송 거리에 많이 의존한다는 것을 발견하였다. 일반적으로 광신호의 세기가 작을 때에는 전송에 따른 눈 잠김 페널티는 광섬유의 색분산이 4ps/nm/km 정도일 때 가장 컸으며 그 양쪽에서 줄어들었다. 하지만 센 광신호를 사용하였을 때에는 이러한 효과는 많이 줄어들었다. 이러한 발견들은 짧은 펄스를 사용한 광전송 선로를 설계할 때 최적의 광섬유 색분산을 결정하기 위하여 많은 고려가 있어야 함을 보여주고 있다.

참 고 문 헌

[1] G. P. Agrawal, Fiber-Optic Communication Systems, 2nd Ed., Wiley-interscience, New York, 1997

[2] A. R. Chraplyvy, "Limitations on lightwave communications imposed by optical-fiber nonlinearities," J. Lightwave Tech., vol. 8, pp. 1548-1557, 1990

[3] J. P. Gordon and L. F. Mollenauer, "Effects of fiber nonlinearities and amplifier spacing on ultra-long distance transmission," IEEE J. Lightwave Tech., Vol. 9, pp. 170-173, 1991

[4] C. Fludger, A. Maroney and N. Jolley, "An analysis of the improvements in OSNR from distributed Raman amplifiers using modern transmission fibres," Optical Fiber Communication Conference, paper FF2, 2000

[5] N. S. Bergano, C. R. Davidson, F. Heismann, "Bit-synchronous polarization and phase modulation scheme for improving performance of optical amplifier transmission systems," Electronics Letters, vol. 32, pp. 52-54, 1996

[6] Y. Miyamoto, A. Hirano, K. Yonenaga, A. Sano, H. Toba, K. Murata, O. Mitomi, 320-Gbit/s (8×40Gbit/s) WDM transmission over 367-km zero-dispersion-flattened line with 120-km repeater spacing using carrier-suppressed return-to-zero pulse format," Optical amplifiers and their applications '99, Paper PD4-1, 1999

[7] M. Nissov et al, "32×20 Gb/s transmission over trans-atlantic distance (6200km) with 31% spectral efficiency," Optical Fiber Communication Conference, Post Deadline Paper30, 2000

[8] A. H. Gnauck, S.-G. Park, J. M. Wiesenfeld and L. D. Garret, "Highly dispersed pulses for 2×40 Gb/s transmission over 800km of conventional single-mode fiber," Electronics Letters, vol. 35, no. 25, pp. 2218-2219, 1999

[9] S.-G. Park, A. H. Gnauck, J. M. Wiesenfeld and L. D. Garrett, "40-Gb/s transmission over multiple 120-km spans of conventional single-mode fiber using highly dispersed pulses," IEEE Photon. Tech. Lett., vol. 12, no. 8, pp. 1085-1087, 2000

[10] B. Mikkelsen, G. Raybon, R.-J. Essiambre, J. E. Johnson, K. Dreyer, and L. F. Nelson, "Unrepeated transmission over 150 km of nonzero-dispersion fibre at 100 Gbit/s with semiconductor based pulse source, demultiplexer and clock recovery," Electron. Lett., Vol. 35, pp. 1866-1868, 1999.

[11] F. Forgiieri, R. W. Tkach and A. R. Chraplyvy "Fiber nonlinearities and their impact on transmission system," in Optical fiber telecommunications, 3rd Ed, I. P. Kaminow and T. L. Koch Eds., Academic Press, San Diego, 1997

[12] G. P. Agrawal, "Nonlinear Fiber Optics," 2nd Ed., Academic Press, San Diego, 1989

[13] R.-J. Essiambre, B. Mikkelsen, and G. Raybon, "Intra-channel cross-phase modulation and four-wave mixing in high-speed TDM systems," Electron. Lett., Vol. 35, pp. 1576-1578, 1999.

[14] M. Shirasaki, Y. Kawahata, S. Cao, H. Oci, N. Mitamura, H. Isono, G. Ishikawa, G. Barbarossa, C. Yang and C. Lin, "Variable dispersion compensator using the virtually imaged phased array for 40-Gb/s WDM transmission systems," ECOC 2000, PD2.3

[15] A. H. Gnauck, L. D. Garrett, Y. Danzinger, U. Levy, M. Tur, "Dispersion and dispersion-slope compensation of NZDSF for 40-Gb/s operation over the entire c-band," OFC 2000, PD8

박 상 규(Park, Sang-Gyu) 정희원  
 1990년 2월 : 서울대학교 전자공학과 졸업  
 1992년 2월 : 서울대학교 전자공학과 석사  
 1998년 12월 : Purdue Univ., Ph.D.  
 <주관심 분야> 광전송시스템, 광섬유광학, 초고속광학

정 제 명(Jeong, Je Myung) 정희원  
 1978년 2월 : 서울대학교 전자공학과 졸업  
 1980년 6월 : KAIST 전자공학과 석사  
 1992년 2월 : Northwestern Univ., Ph.D.  
 <주관심 분야> 광전송시스템, 광다중접속네트워크, 광신호처리